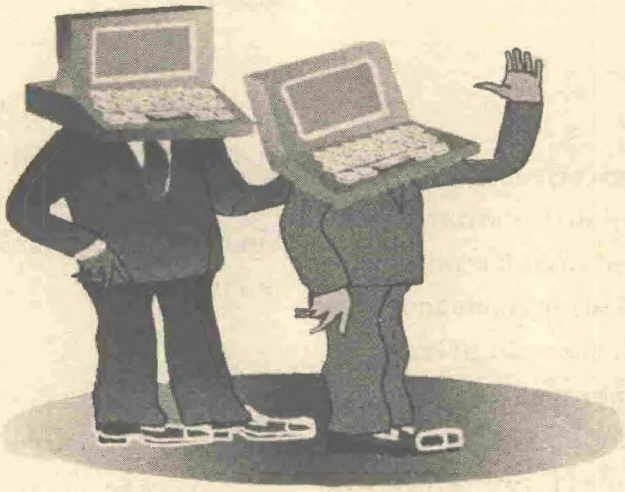
เรื่องน่าอ่าน
สหัส พรหมสิทธิ์

โมเลกูล่าร์ คอมพิวเตอร์ ในระดับโมเลกุล



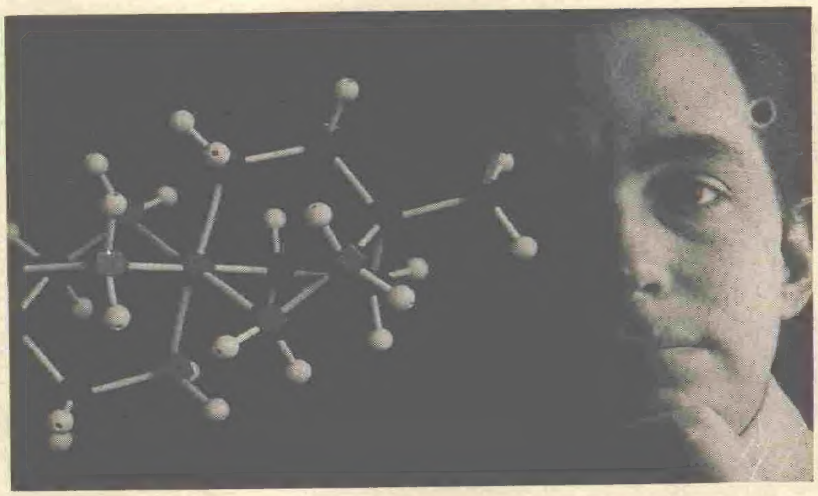
สัมผัสโลกแห่งวิวัฒนาการความล้ำยุคของคอมพิวเตอร์ในระดับของโมเลกุล

ถ้าจะมองดูในโลกของคอมพิวเตอร์ นับตั้งแต่เมื่อราว 40 ปีก่อนจนกระทั่งบัดนี้ จะเห็นว่าขนาดของอุปกรณ์เช่นนี้จะลดจากที่เคยใช้เนื้อที่ห้องใหญ่ ๆ เกือบทั้งห้อง มาเหลือแค่เพียงแผ่นเวเฟอร์ที่มีขนาดเท่าเล็บนิ้วมือคน ส่วนในแง่ของความรวดเร็วในการคำนวณ ก็ได้วิวัฒนาการจากความเร็วที่มีมากอยู่แล้ว ไปเป็นความเร็วอันเหลือเชื่อในปัจจุบัน ปัญหาจึงมีว่าความเล็กกับความเร็วในทำนองนี้จะยังคงดำเนินไปอีกไกลเท่าใด ในแง่ของขีดจำกัดล่างที่เกี่ยวกับขนาด และขีดจำกัดบนที่เกี่ยวกับความเร็ว ซึ่งก็ยังตอบได้ยากเพราะยังมีการค้นคว้าบุกเบิกที่ได้มีการกระทำอย่างต่อเนื่องนับแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในเรื่องของการออกแบบและการสร้างวงจรคำนวณให้ไปถึงขีดจำกัดหนึ่งให้ได้ อันจะทำให้ได้วงจรที่เล็กกว่าที่เป็นอยู่ในขณะนี้หลายเท่าและจะทำงานได้เร็วจนแทบไม่สามารถที่จะหยั่งวัดได้ จนทำให้เกิดมีโมเลกูล่าร์คอมพิวเตอร์ (molecular computer) ที่ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่มีขนาดเท่าโมเลกุล ส่วนเหตุผลของการทำเช่นนี้ก็เป็นเพราะเรื่องของความเร็วเพียงอย่างเดียว ไม่มีอะไรมากกว่านั้น เพราะความเร็วเป็นสิ่งที่ใคร ๆ ก็ต้องการ โดยเฉพาะสำหรับงานที่เกี่ยวกับซิมูเลชัน (simulations) กับงานในด้านกราฟิกที่ต้องการพลกำลังในการคำนวณที่ค่อนข้างจะมากมาย เมื่อเทียบกับงานอื่น ๆ วงจรในระดับโมเลกุล เท่าที่พูดอยู่นี้จะทำงานได้เร็วกว่าพีซีชั้นดีในขณะนี้ราว 100,000 เท่า

คอมพิวเตอร์ในระดับโมเลกุล

สัจธรรมมีอยู่ว่า ขนาดของคอมพิวเตอร์จะเล็กลงไปตามสิ่งที่เป็นองค์ประกอบของมัน ดังจะเห็นได้จากในกรณีของไมโครโปรเซสเซอร์ในปัจจุบันที่มีขนาดเล็กลง และมีอานุภาพมากขึ้นกว่าแต่ก่อน ทำให้คอมพิวเตอร์มีความกะทัดรัดมากขึ้นในรูปของความสามารถลดขนาดจากไมโครคอมพิวเตอร์ที่ค่อนข้างใหญ่เทอะทะมาเป็นแลปท้อปและเป็นแบบสมุดโน้ต หรือปาล์มท้อปในปัจจุบัน ในทำนองเดียวกันคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีขนาดเท่าโมเลกุล (เช่น พวกเกต (gates) และวงจรต่าง ๆ ที่เล็กจนมองไม่เห็น) ก็จะสามารถอาศัยความเล็กจนมองไม่เห็นที่จะแทรกเข้าไปในเซลล์ อันเป็น

เนื้อหนังมังสาของร่างกายของมนุษย์ได้อย่างสบาย โมเลกุล่าร์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็กกว่านิวรอน (เซลล์อย่างหนึ่ง) ที่สามารถที่จะนำมาเชื่อมโยงกันให้เป็นเครือข่ายที่ซับซ้อนมาก ๆ และมีคอมพิวเตอร์นับเป็นจำนวนมากมายที่เข้ามารวมกันอยู่ในที่อันแสนแคบได้ในรูปที่เป็นแบบพาราเลล (parallel) และมีความหนาแน่นสูง ตลอดจนมีความซับซ้อนยิ่งกว่าสมองของมนุษย์เสียอีก เมื่อพูดมาถึงจุดนี้ก็อยากจะเล่าว่า ความคิดที่จะสร้างสิ่งต่าง ๆ ในรูปของจักรยนต์กลไก ตลอดจนคอมพิวเตอร์ให้มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่น ในระดับอะตอมและโมเลกุลนั้นได้มีมานานแล้วดังจะเห็นได้ เช่น ในปี ค.ศ. 1957 ที่มีนักฟิสิกส์ระดับรางวัลโนเบลล์ ชื่อว่า ดร.ริชชาร์ด เฟนแมน ซึ่งได้เคยพูดต่อหน้าชุมนุมชนในหัวข้อเรื่องว่า "ยังมีอะไร ๆ ให้ทำได้อีกมากในส่วนที่อยู่ก้นบึ้ง" (There's Plenty of Room at the Bottom) ซึ่งสามารถสรุปย่อ ๆ ได้ว่า การพยายามสร้างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ให้มีขนาดที่อยู่ในระดับโมเลกุลด้วยการจัดการในขั้นรายละเอียด แบบทีละอะตอม จนได้สิ่งที่ต้องการนั้นไม่ได้ถือว่าเป็นของแปลกหรือฝืนธรรมชาติแต่อย่างใด แต่เป็นสิ่งที่เป็นไปได้และชอบด้วยเหตุผลในทางปฏิบัติ แต่ที่ไม่ค่อยมีใครกล้าทำก็เพราะมนุษย์ชอบมองแต่สิ่งที่เห็น หรือจับต้องได้ซึ่งเป็นการมองโลกโดยอาศัยความใหญ่เป็นเกณฑ์แทนที่จะยึดเอาความเล็กเป็นหลัก จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1987 ก็ได้มีนักวิทยาศาสตร์นามกระเดื่องอีกคนซึ่งเป็นนักปราชญ์ของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด และมีชื่อว่า เค.อีริค เดร็กซเลอร์ (K. Eric Drexler) ได้เขียนหนังสือเล่มหนึ่งที่เรียกว่า Engines of Creation



รูปที่ 1 เค.อีริค เดร็กซเลอร์ นักทฤษฎีในเรื่องของนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology)

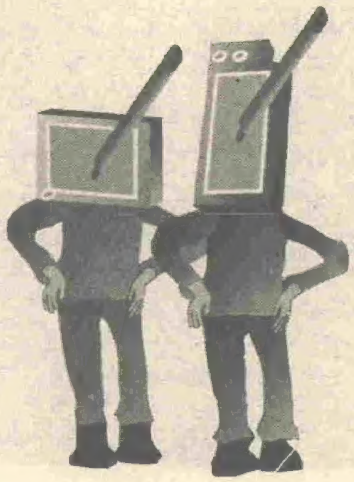
(1987) ซึ่งเป็นการเล่าถึงผลการค้นคว้าของเขาในเรื่องของการสร้างจักรยนต์กลไกในระดับโมเลกุล โดยได้รวมไปถึงคอมพิวเตอร์ด้วย ซึ่งก็คงจะได้รับอิทธิพลทางความคิดมาจากนักวิทยาศาสตร์รุ่นก่อน ๆ (เช่น ดร.เฟนแมน) ก็เป็นได้

ตามความคิดของเดร็กซเลอร์นั้นจะไม่ได้เกี่ยวกับการสร้างแค่เพียงโมเลกุลใหม่ ๆ เท่านั้น แต่จะเป็นการสังเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลต่าง ๆ ในรูปของเครื่องจักรที่มีขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเมื่อได้มีการนำวัตถุดิบมาป้อนเข้าไปก็จะสามารถผลิตสิ่งต่าง ๆ ให้ได้ รวมทั้งการสามารถที่จะแตกตัวออกไปเป็นคู่แฝด จะเป็นการสืบพันธุ์ชนิดที่เป็นการแตกหน่อขยายจำนวนได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้นเพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณในการผลิตได้อย่างทันอกทันใจในแง่ที่ว่าในทุก ๆ ชั่วโมงที่ผ่านไป โรงงานที่มีขนาดเท่ากับเม็ดทรายนี้จะทำการผลิตชิ้นส่วน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ นับเป็นพันล้านชิ้น ตัวอย่างของเครื่องจักรที่เล็กมาก ๆ ที่เป็น นาโนแมชีน (nanomachines) ที่พบได้ในธรรมชาติก็จะมีอาทิเช่น เอ็นไซม์ (enzymes) ที่ทำหน้าที่เป็นจักรกลที่ก่อให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ ส่วนการที่จะสั่งการให้นาโนแมชีนทำในสิ่งที่ต้องการให้นั้นก็จะต้องอาศัยซอฟต์แวร์เข้าช่วย ซึ่งจะเหมือน ๆ กับการออกแบบและทดสอบชิ้นส่วนของเครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ด้วยเวอร์กสเตชันแบบตั้งโต๊ะที่เป็นไปอย่างสะดวกรวดเร็ว ในปัจจุบันซึ่งเมื่อ 20 ปีที่แล้ว ก็ไม่มีใครคิดว่าจะทำเช่นนี้ได้ ความคิดในเรื่องของนาโนแมชีนในกรณีของ เดร็กซเลอร์นี้ก็น่าจะมาในทำนองเดียวกัน เพราะได้วิวัฒนาการมาจากการสังเกต การรุดหน้าในด้านชีววิทยาในระดับโมเลกุล (molecular biology) กับชีวเคมี (biochemistry) ว่าในอีกไม่ช้าไม่นาน เช่นไม่เกิน 30 ปี นับจากนี้มนุษย์ก็จะสามารถมีโรงงานเล็ก ๆ ในระดับนาโน ดังเช่นในรูปที่ 1 ที่ผลิตอะไรต่อมิอะไรให้ได้โดยอาศัยการสั่งงานผ่านทางซอฟต์แวร์ แต่ก่อนจะถึงขั้นนั้นก็จะขอพูดถึงในสถานะของปัจจุบันว่าวิทยาการ ในส่วนที่เกี่ยวกับขนาดความเล็กในด้านคอมพิวเตอร์ได้ก้าวไปถึงไหนแล้ว

อัตราส่วนของความเล็ก

สมมติฐานในเรื่องความเล็กมาก ๆ จะมีว่า ถ้าเราสามารถเข้าไปจัดการกับสิ่งต่าง ๆ ในระดับปรมาณู หรือโมเลกุลได้ ก็จะสามารถสร้างคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และเร็วมาก ๆ ได้อันทำให้ต้องหันมาทำความเข้าใจ คำบางคำที่ใช้บอกขนาดในเรื่องของความเล็กและความเร็ว โดยจะเริ่มที่คำว่า มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับเศษหนึ่งส่วนพันของเมตร อันเป็นหน่วยที่ใช้วัดขนาดของซิลิกอนชิพ แบบที่ยังไม่มีอะไรมาห่อหุ้ม เล็กลงไปจากมิลลิเมตรก็เป็น "ไมครอน" ที่เท่ากับเศษหนึ่งส่วนล้านเมตร ทรานซิสเตอร์ต่าง ๆ ที่อยู่บนซิลิกอนชิพจะมีหน่วยที่แสดงขนาดเป็นไมครอน ถัดไปก็เป็น นาโนมิเตอร์ (nanometer หรือ nm) ที่เท่ากับเศษหนึ่งส่วนพันล้านเมตร ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้วัดขนาดของโมเลกุล คราวนี้ก็มาถึงเรื่องของ "เวลา" บ้าง ซึ่งก็จะขอเริ่มที่ไมโครวินาที ที่มีค่าเท่ากับเศษหนึ่งส่วนล้านของวินาที ส่วนคำว่า "นาโนวินาที" ก็จะมีค่าเท่ากับเศษหนึ่งส่วนพันล้านวินาที อันเป็นระดับความเร็วของแสงที่วิ่งผ่านหน้ากระดาษขนาด A4 ต่อไปก็เป็นคำว่า "ปิโควินาที" (picosecond หรือ ps) ที่มีค่าเท่ากับเศษหนึ่งส่วนล้านล้าน (หรือ 10^{-12}) วินาที ถัดจากนี้ก็เป็น เฟมโตวินาที (femtosecond) ที่เท่ากับเศษหนึ่งส่วนพันของปิโควินาที อันเป็นหน่วยวัดเวลาที่เล็กมาก ๆ จนจับไม่ได้ไล่ไม่ทัน

ซิลิกอน ไอซี (IC) ที่มีความแน่นสูงสำหรับเมื่อราว 2 ปีมาแล้ว จะมีทรานซิสเตอร์บรรจุอยู่ราว 50,000 ตัว ในหนึ่งตารางมิลลิเมตร ซึ่งแต่ละส่วนประกอบสำหรับกรณีนี้ก็จะห่างกันราว 1 ถึง 2 ไมครอน (M) และจะสามารถ

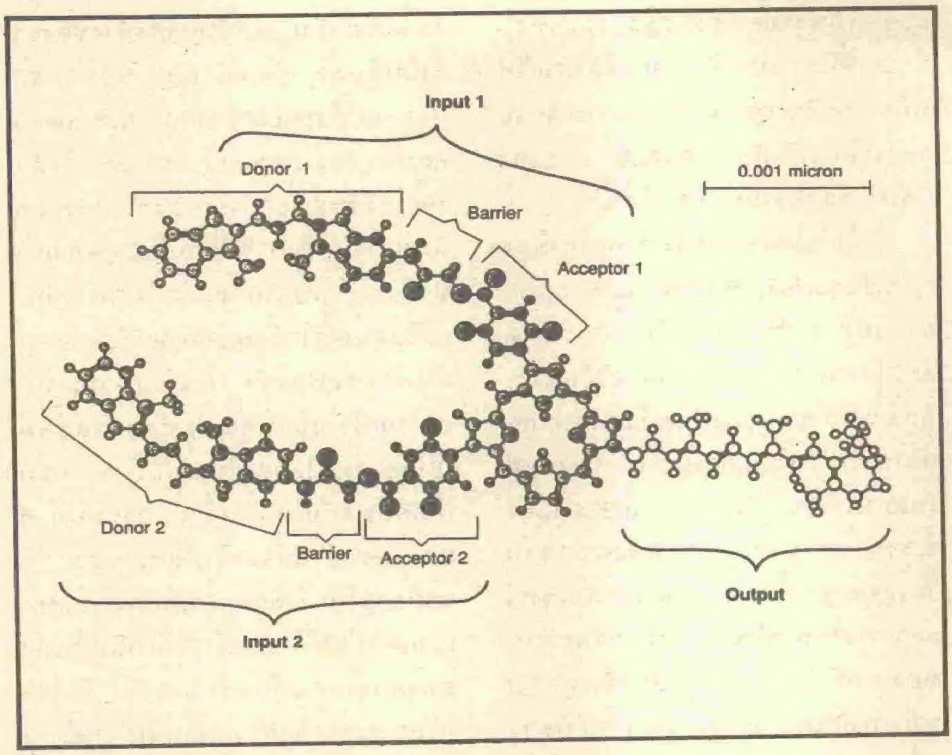


ลดขนาดลงได้อีกถึงร้อยละ 90 ถ้าได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีในการผลิตให้ดีขึ้น พร้อมทั้งใช้วัสดุใหม่ ๆ เข้าช่วย แต่ก็มีผู้เห็นว่าอีกไม่ช้าขนาดความเล็กเช่นนี้ก็จะต้องก้าวไปถึงขีดจำกัดอย่างเลี่ยงไม่ได้ เพราะในขณะที่ขนาดต่าง ๆ ลดลงพร้อม ๆ กับที่ความแน่นได้เพิ่มขึ้นนั้น ส่วนต่าง ๆ บนซิลิกอน ชิพก็จะเริ่มระบายความร้อนได้ยาก จนเริ่มเกิดปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนไม่ทัน ซึ่งก็จะเกิดอาการร้อนจัดขึ้นได้ง่าย ๆ ที่สำคัญก็คือว่า ในช่วงของความห่างระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ที่น้อยมาก ๆ เช่นในระดับ 1 ส่วน 10 ไมครอนนี้ก็จะเกิดอาการที่อิเล็กตรอนต่าง ๆ เริ่มจะกระโดดไปมา (funnel) อย่างไม่มีระเบียบกฎเกณฑ์ใด ๆ จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง จนทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ในชนิดที่เป็นฉับพลันทันที (spontaneous short circuits)

อนึ่ง อาณาเขตอันเป็นเส้นแบ่งระหว่างความเร็วในระดับจุล (microscopic) และกับโมเลกุลจะเป็น 1 ไมครอน ซึ่งถ้าต่ำกว่านี้ก็จะเป็นความแตกต่างระหว่างไมโครกับโมเลกุล อันเป็นความก้ำกึ่งไม่แน่นอนที่ต้องนำทั้งเรื่องของมาตราส่วน (scale) กับเรื่องของโดเมน (domain) เข้ามาพิจารณาพร้อม ๆ กัน คือในระดับไมโคร (microscopic level) นั้น หลักต่าง ๆ ในทางอิเล็กทรอนิกส์ยังใช้การได้อยู่ แต่ถ้าเล็กลงไปกว่านี้ก็จะเข้าไปสู่ในอาณาจักรของควอนตัม ฟิสิกส์ (quantum physics) ซึ่งจะใช้วิชาอิเล็กทรอนิกส์มาอธิบายสิ่งต่าง ๆ ไม่ได้ เพราะความเป็นไฟฟ้า จะไม่ได้เป็นปรากฏการณ์อย่างรวม ๆ อีกต่อไป แต่จะต้องมองกันเป็นจำนวนเล็ก ๆ ที่เรียกว่า quirky individuals แบบตัวใครตัวมัน เพราะในระดับของควอนตัมนี้ทุกอย่างจะเปลี่ยนไปหมด อันหมายถึงว่า จะไม่สามารถนำกฎเกณฑ์เท่าที่เคยใช้อยู่มาสร้างทรานซิสเตอร์ในระดับโมเลกุลได้อีกต่อไป เพราะจะต้องการองค์ประกอบอันใหม่ รวมทั้งวิธีการแบบใหม่ ๆ ในการสร้างวงจรในระดับซับไมครอน (submicron circuits) ขณะนี้ทั้งสหรัฐฯและญี่ปุ่น (หรืออาจมีประเทศอื่น ๆ ในยุโรป) ได้กำลังหาทางสร้างโมเลกุล่าร์คอมพิวเตอร์อยู่ และถ้าวิทยาการในด้านเทคโนโลยีกึ่งตัวนำเท่าที่เป็นอยู่ในขณะนี้ไม่สามารถที่จะให้การสนับสนุนได้ ก็จะต้องมาดูกันว่าจะต้องอาศัยวิทยาการอะไรกันต่อไป จึงจะทำให้ความเป็นเช่นนี้เป็นไปได้

โมเลกุล่าร์อิเล็กทรอนิกส์

การพยายามดั้นด้นที่จะหาทางให้อิเล็กทรอนิกส์เท่าที่เป็นอยู่นั้น สามารถทำงานในระดับโมเลกุลให้ได้ ซึ่งก็อาจมีปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่จะเข้ามาทำให้บรรลุจุดมุ่งหมายเช่นนี้ไม่ได้ จนต้องมองหาอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบอื่นที่จะมาช่วยแก้ปัญหาเพื่อให้บรรลุจุดมุ่งหมายให้ได้ อันทำให้ต้องมองและสังเกตปรากฏการณ์ในทำนองนี้ให้กว้าง



รูปที่ 2 NAND เกตในระดับโมเลกุลที่ทำงานด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเศษ 4 ส่วนพันล้านเมตร และทำงานได้เร็วกว่าซิลิกอนเกต 10,000 เท่า อันเป็นผลงานของ CME ของมหาวิทยาลัยไซราคิว ในสหรัฐฯ

ขึ้นกว่าเก่า ในแง่ที่ว่าอะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ มักจะทำการแลกเปลี่ยน แบ่งปัน ตลอดจนโอนถ่ายอิเล็กตรอนไปมาระหว่างกันอย่างเป็นเนืองนิจ โดยที่อิเล็กตรอนจากอะตอมที่อยู่ตรงส่วนหนึ่งของโมเลกุลสามารถที่จะวิ่งไปยังอีกอะตอมที่อยู่ที่ไหนก็ได้ การเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนต่าง ๆ ดังกล่าว สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของโมเลกุลได้ เช่นความสามารถในการนำไฟฟ้าตลอดจนการดูดกลืนแสงในบางช่วงคลื่นได้ คุณสมบัติเช่นนี้ได้เข้ามาเป็นประโยชน์แก่นักวิจัยในแง่ของความสามารถใช้ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังกล่าว ในการสร้างโมเลกุล่าร์ อิเล็กทรอนิกส์ ดีไวซ์ (molecular electronic devices หรือ MEDs) ดังเช่นในกรณีของริชชาร์ด โปเต็มเบอร์ (Richard Potember) และคณะที่ประจำอยู่ที่ห้องทดลองฟิสิกส์ประยุกต์ของมหาวิทยาลัย จอห์นฮอบกิ้น ที่ได้พัฒนาสวิตช์แบบหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของทองแดงกับอินทรีย์-โมเลกุลที่เรียกว่า tefracyanoquinodimethane (TCNQ) ที่รวมกันเป็นฟิล์มบาง ๆ และเมื่อมีการส่งคลื่นของไฟฟ้าที่มีความต่างศักดิ์สูงหรือแสงเลเซอร์เข้ามาที่ฟิล์ม ก็จะทำให้อะตอมของทองแดงหยุดอยู่ในที่หนึ่ง หรือเคลื่อนออกไปอีกทีหนึ่ง TCNQ ซึ่งทำให้ฟิล์มเช่นนี้แปรสภาพจากตัวนำไฟฟ้าไปเป็นสภาพที่ไม่นำไฟฟ้าชนิดสลับกันได้ ส่วนในอีกห้องทดลองหนึ่ง เช่นที่ Center for Molecular Electronics (CME) ของมหาวิทยาลัยไซราคิว ในสหรัฐฯ ก็ได้พัฒนาแรมที่มีความเร็วสูง โดยอาศัยโมเลกุลชนิดหนึ่งที่เรียกว่า bacteriorhodopsin ภายใต้การนำของดร. โรเบิร์ต-เบิร์จ โมเลกุลชนิดนี้เป็นปิกเม้นท์ที่มีความไวต่อแสงที่พบในเรตินาของดวงตาคน โดยจะอยู่ในรูปของแบคทีเรียชนิดหนึ่ง คลื่นของแสงเลเซอร์ที่ส่งมากระทบโมเลกุลนี้จะสามารถเปลี่ยนโมเลกุลจากสภาพหนึ่งไปสู่อีกสภาพหนึ่งได้ และโมเลกุลจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ (switch) อย่างหนึ่งที่มี switching time เท่ากับ 3 ปิโควินาที (1 หนึ่งปิโควินาทีจะเท่ากับ 10^{-12} วินาที) อันน่าจะเป็นจุดเริ่มต้นของการพยายามสร้างวงจรลอจิก (logic circuit) ในระดับโมเลกุล ซึ่งก็ได้มีผลงานในช่วงแรก ๆ ที่ปรากฏดังในรูปที่ 2 ซึ่งเป็น NAND gate ในระดับโมเลกุลที่พัฒนาโดย CME ที่มีลักษณะเหมือน Wishbone (กระดูกสามแฉก) ซึ่งประกอบสองขา (legs) และหนึ่งคอ (neck) โดยแต่ละ "ขา" จะเป็นอินพุต และจะมีส่วนที่เป็น "คอ" ที่เป็นเอาต์พุต

อนึ่ง NAND เกต สำหรับในกรณีนี้ก็คือ ลอจิกเกต ชนิดหนึ่งที่เอาต์พุตจะอยู่ในสภาพที่เป็น on เมื่ออินพุตอันใดอันหนึ่งเป็น off เกตเช่นนี้จะเป็นโมเลกุลเดี่ยวที่ซับซ้อน ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4 นาโนมิเตอร์ โดยจะมีขนาดพอ ๆ กับเฮโมโกลบิน-โมเลกุล ซึ่งจัดได้ว่าเป็นเกตที่มีความเล็กมาก ๆ ในท่ามกลางความเร็วอันสูงประดุจสายฟ้า เพราะจะมี firing time ที่มีระยะเวลาที่สั้นจนแทบจะวัดไม่ได้ นั่นก็คือ จะน้อยกว่า femtosecond และจะมี cycle time ที่เท่ากับ 3 ปิโควินาที ซึ่งเมื่อ

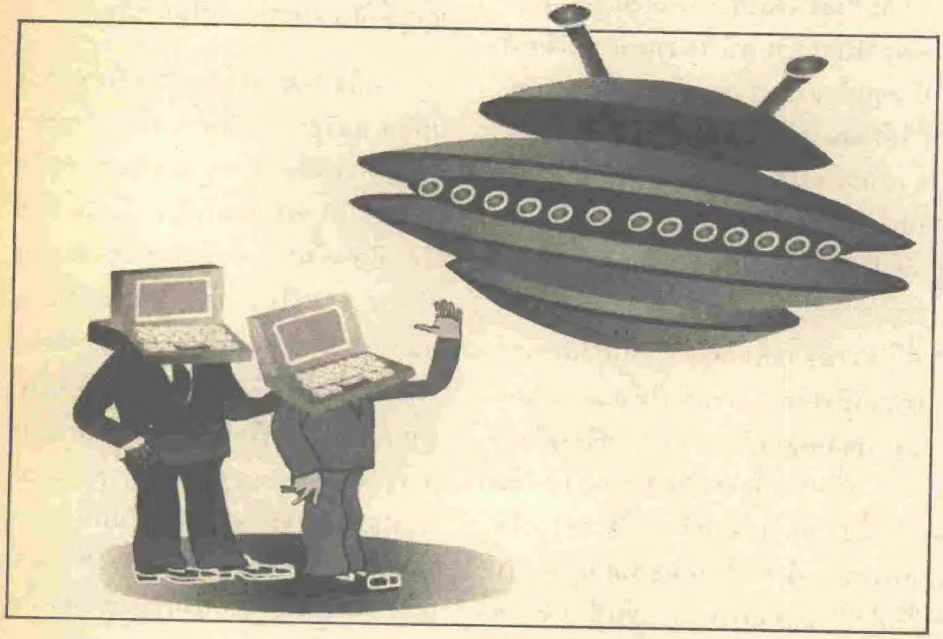
นำไปเทียบกับความเร็วของเกตที่อยู่ใน Cray ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็ว 12 นาโนวินาที ซึ่งหมายถึง ความล่าช้ากว่าเกตที่เป็นแบบโมเลกุล ถึง 10,000 เท่า

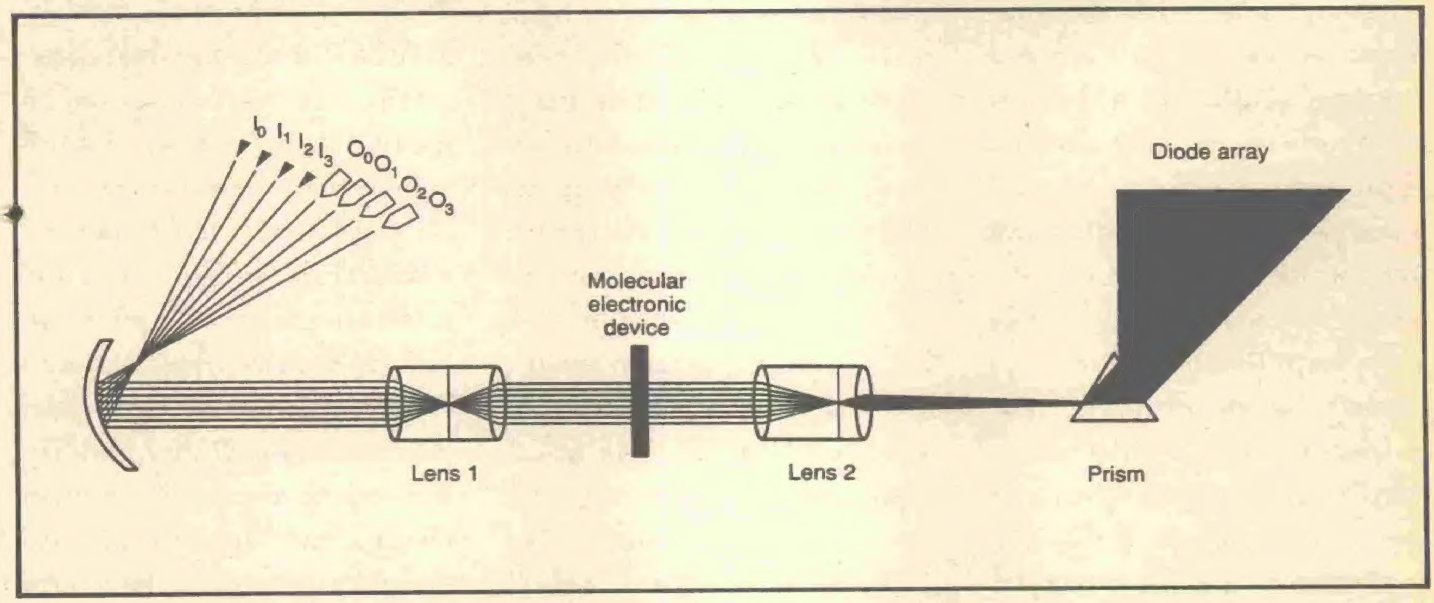
เรื่องของอินเตอร์เฟส

อุปสรรคอันแรกในการก้าวไปสู่โมเลกุล่าร์-อิเล็กทรอนิกส์ ก็คือ เรื่องที่เรียกว่า contact problem หมายถึงว่า ในทางปฏิบัตินั้นจะทำการอินเตอร์เฟส (interface) กับสิ่งที่เล็กมาก ๆ ในระดับโมเลกุลได้อย่างไร ทางออกขั้นแรกก็คือการใช้สายไฟอันเป็นตัวนำที่เรียกว่า molecular wires ที่สร้างจากโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนที่นำไฟฟ้าได้ ซึ่งก็จะต้องเป็นกลุ่มของสายสนกลไกทางอิเล็กตรอนที่มีขนาดใหญ่ระดับโมเลกุล ที่ยังถือว่าไม่ได้เป็นการแก้ปัญหาที่ดี จึงได้มีการคิดหาทางอื่นต่อไปอีก เช่น การใช้หลักของ optical coupling ซึ่งหมายถึง การอาศัยลำแสงของเลเซอร์ให้ทำหน้าที่เป็นสายไฟที่นำแสง เพราะเลเซอร์มีความคล่องตัวสูง รวมทั้งมีลำแสงที่มีความละเอียดเล็กดุจดังสายไฟที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และมีความเร็วในระดับเดียวกันกับ NANA เกตของ CME ตลอดจนการมีข้อดีอื่น ๆ

ซึ่งก่อนจะพูดอะไร ๆ ในเรื่องของ optical coupling ต่อไปนั้น จะขอวกกลับมาที่รูปที่ 2 เพื่ออธิบายในรายละเอียดต่อไปอีกว่า โมเลกุล่าร์เกตทางอิเล็กทรอนิกส์ ตามที่แสดงในรูปนี้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางแค่ 4 นาโนมิเตอร์เท่านั้น และจะอยู่ในสภาพที่เป็น optically coupled ในแง่ที่ว่าการอ่านข้อมูลเข้าและออกจากโมเลกุลเช่นนี้จะอาศัยลำแสงเลเซอร์แทนการใช้สายไฟฟ้า โดยแต่ละส่วนของเกตที่ประกอบด้วยสองอินพุตกับหนึ่งเอาต์พุต จะดูดกลืนแสงที่มีช่วงคลื่นต่างกัน ส่วนการป้อนอินพุตเข้าไปก็จะอาศัยคลื่นเลเซอร์ (pulsed lasers) ส่องเข้าไปที่เกต ตามในรูปที่ 2 และจะมีการอ่านเอาต์พุต โดยอาศัยเลเซอร์อันที่สามโดยผ่านเกต ซึ่งถ้าแสงวิ่งผ่านไปได้ก็แสดงว่าสัญญาณของเอาต์พุตจะอยู่ในรูปที่เป็น on แต่ถ้าแสงวิ่งผ่านไม่ได้ก็จะเป็น off ในแต่ละข้างของขาที่เป็นอินพุต (input leg) ของเกตจะประกอบด้วยแอคเซ็พเตอร์ (acceptor) และโดเนอร์ (donor) อย่างละหนึ่งตัว โดยจะมีสิ่งที่เรียกว่า แบร์เรียร์ (barrier) กั้นขวางอยู่ในกรณีที่ไม่มีอินพุตส่งเข้ามาที่เกต โดเนอร์แต่ละตัวก็จะส่งอิเล็กตรอนหนึ่งตัวไปที่แอคเซ็พเตอร์อิเล็กตรอนเป็นจำนวนสองตัว อันเป็นส่วนเกินนี้จะไปแปรเปลี่ยนคุณสมบัติของส่วนที่เป็นเอาต์พุตโดยจะไปอยู่ใกล้ ๆ ครั้นเมื่ออินพุตอันใดอันหนึ่งถูกกระทบด้วยแสงเลเซอร์ในช่วงคลื่นที่เหมาะสม ก็จะมีการโอนอิเล็กตรอนกลับจากแอคเซ็พเตอร์ไปที่โดเนอร์ แต่ถ้าอินพุตทั้งสองอันถูกกระตุ้นพร้อม ๆ กัน อิเล็กตรอนสองตัวก็จะวิ่งออกจากส่วนที่เป็นเอาต์พุตพร้อม ๆ กัน อันจะทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น ผลก็คือ แอ็บซอร์ฟชัน-แบนด์ (absorption band) ของเอาต์พุต (หรือช่วงคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืนก็จะเคลื่อนไปอยู่ในพิสัย (range) ของเอาต์พุตเลเซอร์ โดยจะไปปิดทางเดินของแสง อนึ่ง ขนาดของเกตทั้งตัวจะเล็กกว่าลำแสงเลเซอร์อันทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องอาศัยความแม่นยำในการส่งลำแสงไปบนอินพุตหรือเอาต์พุตแต่อย่างใด นอกจากนี้ก็ได้มีการกำหนดแอดเดรส (address) ของเกตโดยอาศัยหลักการทัศนศาสตร์ (optics) และอาศัยช่วงคลื่นของแสงที่ต่าง ๆ กัน แทนที่จะอาศัยการกำหนดตำแหน่งที่อยู่แบบที่ใช้สายไฟหลาย ๆ สาย อันทำให้สามารถที่จะวางเกตไว้ตรงไหนก็ได้ ภายใน MED (molecular electronic device) พร้อมด้วยการวางอินพุตและเอาต์พุตแต่ละอันไว้ในโมเลกุลตามแต่จะสะดวก

ตัวอย่างอันหนึ่งของ MED ก็ได้





รูปที่ 3 แสงเลเซอร์ที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน 8 ชนิด ที่ประกอบด้วย 4 อินพุตกับ 4 เอาต์พุตแชนเนิล จะถูกนำมาผ่านเข้าไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล และจะมีการอ่านความหมายของลำแสงที่ผ่านออกมา โดยอาศัยไดโอดแอร์เรย์ (diode array) หรือ DA ส่วนประกอบต่าง ๆ ใน MED (molecular electronic device) จะ สามารถเปิดและปิดความถี่ของแสงที่เป็นเอาต์พุตว่าจะให้ผ่านหรือไม่ให้ผ่านออกไป

แสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นดีไวซ์ขนาด 4 บิต และทำงานด้วยหลักของการควบแสง (optically coupled) โดยมีอินพุตและเอาต์พุตเลเซอร์อย่างละ 4 ตัว แต่ละ I/O แชนเนิลจะแทนด้วยลำแสงเลเซอร์ที่มีช่วงคลื่นอันหนึ่ง ซึ่งจะมีอินพุตที่แทนด้วย I_0 ถึง I_3 และมีเอาต์พุตเลเซอร์ที่แทนด้วย 0_0 ถึง 0_3 สิ่งที่จะมาทำหน้าที่อ่านเอาต์พุตก็คือไดโอดที่ไวต่อแสงชุดหนึ่ง (DA) นอกจากนี้ก็จะมีเลนส์อันที่ 1 (Lens 1) ที่จะรวมแสงและกระจายแสงเพื่อส่งต่อไปที่ MED จากนี้แสงก็จะมาที่เลนส์อันที่ 2 (Lens 2) ที่จะมีการรวมแสงต่อไปอีก แล้วส่งต่อไปยังปริซึม (Prism) ที่จะทำหน้าที่แตกลำแสงออกเป็นส่วน ๆ อีกครั้ง โดยที่อิทธิพลของลำแสงเลเซอร์จะมีแค่เฉพาะส่วนที่เป็น I/O ของ MED เท่านั้น

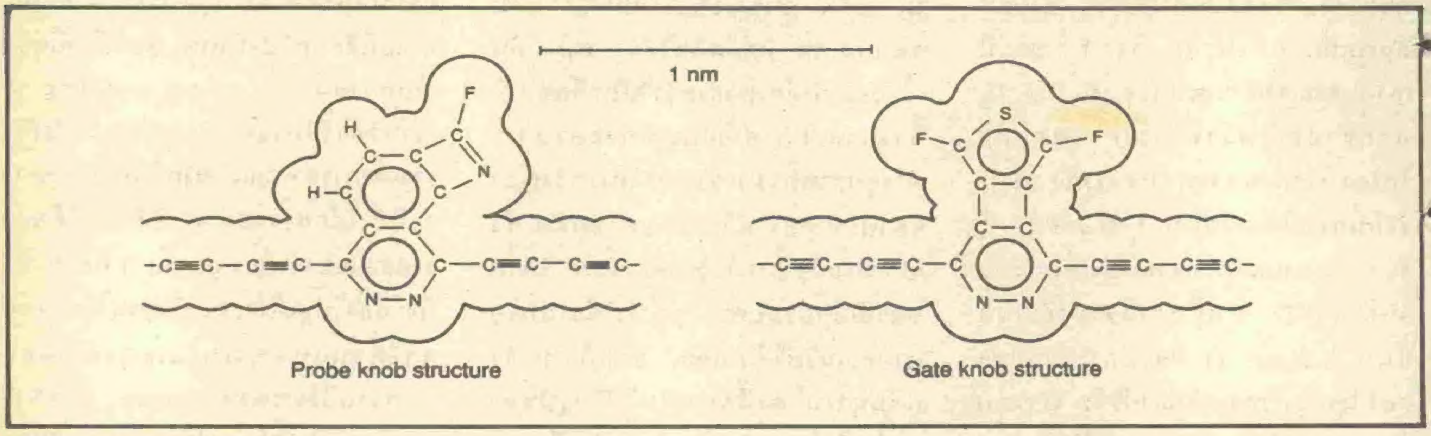
กฎแห่งความน่าจะเป็นกับโปรตีน

เกตในรูปของโมเลกุลเท่าที่ได้พูดมาในข้างต้นนี้จะให้ความร้อนออกมาน้อยมาก ในขณะทำงานเมื่อเทียบกับซิลิกอนเกต แต่ก็ผลิตได้ยากมาก อันเนื่องจากว่าต้องคอยระวังไม่ให้เกิดตำหนิริ้วรอยต่าง ๆ อันเกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม รวมทั้งต้องระวังเรื่องของปรากฏการณ์ในระดับควอนตัม ซึ่งจะหมายถึง การต้องคาดคะเนพฤติภาพของอิเล็กตรอนต่าง ๆ ที่ทำได้ยากหรือคาดคะเนไม่ได้เอาเลย วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาเรื่องนี้ก็จะเป็นไปในรูปของโมเลกุล่าร์เกต นับเป็นพันตัวที่เหมือน ๆ กันให้ทำงานแบบขนานกัน (parallel) ในรูปของอุปกรณ์ หรือส่วนประกอบหนึ่งชิ้น ซึ่งตามภาษาของโมเลกุล่าร์อิเล็กทรอนิกส์นั้น การใช้โมเลกุลนับเป็นพันตัวในดีไวซ์เพียงอันเดียว จะเรียกว่า bulk technology ส่วนเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการเช่นนี้ก็จะออกมาเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ผ่านการกลั่นกรองเอาอาการผิดปกติต่าง ๆ รวมทั้งการคลาดเคลื่อนทางสถิติออกไปจนหมด ซึ่งก็ต้องถือว่าเป็นความดีของ optical coupling ที่เข้ามาทำให้การทำงานอย่างขนานกัน รวมทั้งการหาค่าเฉลี่ยจากคำตอบหลาย ๆ ค่าที่ทำได้อย่างสะดวก ที่สำคัญก็ถือว่าลำแสงเลเซอร์เพียงเส้นเล็ก ๆ ก็สามารถที่จะส่องไปบนโมเลกุลเป็นจำนวน 1,000 ตัวได้ง่ายเท่า ๆ กับโมเลกุลตัวเดียว นอกจากนี้ในขณะทำงานนั้น NAND เกตต่าง ๆ จะไม่ยอมให้แสงเลเซอร์ผ่าน ผลก็คือ NAND เกตเป็นกลุ่มเช่นนี้ก็จะทำให้เอาต์พุตในรูปของแสงเลเซอร์มีระดับความสว่างลดลง แสดงถึง

ความสมบุกสมบันในแง่ที่ว่า แม้ว่าเพียงร้อยละ 90 ของเกตจะใช้การได้ในขณะใดขณะหนึ่งก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของการคำนวณลดลงแต่อย่างใด อันเนื่องมาจากการอาศัยจำนวน (ของเกต) มากเข้าว่า ความเล็กในระดับโมเลกุลนี้ได้ทำให้สามารถบรรจุ NAND เกต จำนวน 100,000 ตัวลงบนเนื้อที่หนึ่งตารางไมครอนได้อย่างสบาย การที่ต้องใช้เกตเป็นจำนวนค่อนข้างมากนี้จึงไม่น่าจะมีข้อเสียเท่าใดนัก เมื่อเทียบกับความได้เปรียบในเรื่องของการมีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับโมเลกุล สิ่งที่น่าจะให้การสังเกตสำหรับในที่นี้ก็คือว่า โมเลกุล่าร์อิเล็กทรอนิกส์ อาจไม่ได้ทำให้คอมพิวเตอร์เล็กลงกว่าในปัจจุบันได้มาก ๆ ก็จริง แต่จะทำให้คอมพิวเตอร์เร็วขึ้น อันเป็นสิ่งที่คนส่วนใหญ่ปรารถนา

คอมพิวเตอร์ของอีริค เดร็กซเลอร์

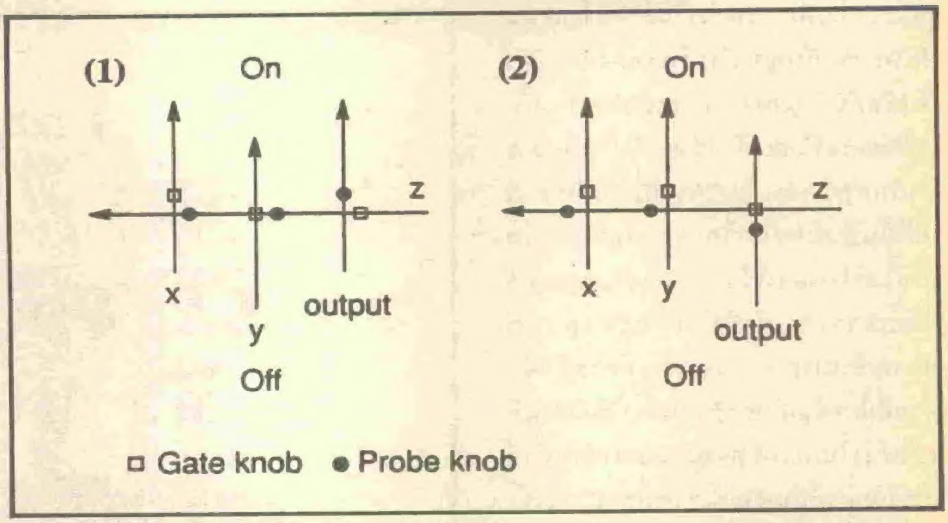
ในปี ค.ศ. 1833 ชาร์ลส์ บาบเบจ (Charles Babbage) ได้เริ่มออกแบบอุปกรณ์การคำนวณที่เรียกว่า analytical engine อันถือได้ว่าเป็นดิจิตอลและคอมพิวเตอร์ที่ทำงานด้วยหลักของทางกลที่อาศัยกำลังจากไอน้ำและขับเคลื่อนด้วยข้อเหวี่ยง (rods) และเฟือง (gears) แต่ไม่ประสบผลสำเร็จ จนกระทั่งอีก 150 ปีต่อมา ก็ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ เค.อีริค เดร็กซเลอร์ (ตามรูปที่ 1) ที่ได้ทำการออกแบบคอมพิวเตอร์ที่เหมือน ๆ กับชาร์ลส์ บาบเบจ แต่ได้มาในมาตของความเล็กในระดับโมเลกุล (nanometer scale) อันเป็นการเสนอรูปแบบของคอมพิวเตอร์ที่ผู้ออกแบบได้ให้ชื่อว่ามีความเป็นอนุรักษ์นิยมอย่างแท้จริง อันเนื่องจากว่า เดร็กซเลอร์ได้พยายามเลี่ยงปัญหาอันยุ่งยากต่าง ๆ ในด้านควอนตัมฟิสิกส์ ด้วยการออกแบบคอมพิวเตอร์ โดยใช้หลักการที่เหมือนกับของบาบเบจที่จะส่งสัญญาณด้วยการผลักและดึงแกนก้านของคาร์บอน (rode of carbon) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในระดับอะตอม เดร็กซเลอร์เชื่อว่านาโนคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ยังคงจะต้องอาศัยวิทยาการในด้านโมเลกุล่าร์อิเล็กทรอนิกส์มาทำให้เป็นไปได้ ซึ่งสำหรับในกรณีของเดร็กซเลอร์นี้ ก็จะเป็นนาโนคอมพิวเตอร์ที่ทำงาน โดยอาศัยหลักของทางกลที่ออกแบบได้ง่ายและเข้าใจง่าย อันจะเป็นคอมพิวเตอร์ในระดับโมเลกุลที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด เพราะได้ใช้หลักของความเป็นอนุรักษ์ที่แทบจะไม่มีการเสี่ยงมาเป็นพื้นฐานของแบบในการสร้างนาโนคอมพิวเตอร์ จึงน่ามาดูว่าคอมพิวเตอร์แบบนี้เป็นเช่นใด ซึ่งก็จะขอเริ่มตรงจุดที่ว่า สิ่งที่ทำหน้าที่เป็น แกน (rods) ในนาโนคอมพิวเตอร์ของเดร็กซเลอร์จะอยู่ในรูปของสายโซ่ (chain) ของปรมาณูของคาร์บอนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางความกว้างหนึ่งอะตอม และมีความยาวที่เป็นเศษส่วนของไมครอน และในทุก ๆ สองหรือสามนาโนมิเตอร์ ก็จะมีปุ่ม (Knobs) ยื่นโผล่ออกมาจากแกน ในรูปของแมตริกซ์แบบสามมิติ โดยจะสามารถเลื่อนไปมาในแชนเนิลต่าง ๆ ภายใน "กรอบ" ที่ตายตัว และจะตัดกันในแนวตั้งฉาก ในจุดที่แกนต่อแกนมาตัดกันนี้ ถ้าเผอิญมีสิ่งที่เป็น



รูปที่ 4 สิ่งที่เป็นแกน (rods) ในภาพข้างต้น จะเป็นปรมาณูของคาร์บอนที่โยงจากปลายหนึ่งไปอีกปลายหนึ่ง โดยจะมีการออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้ปุ่มต่าง ๆ (knobs) ทำปฏิกริยากันเองในขณะที่วิ่งมาแตะสัมผัสกัน สำหรับกรณีที่แกนต่าง ๆ เกิดมีการเลื่อนไปมาในช่วงขณะของการทำงานของคอมพิวเตอร์แบบนี้ (นาโนคอมพิวเตอร์ตามแนวความคิดของ เค.อีริค เดร็กซเลอร์)

ปุ่มปม (Knob) ติดอยู่ก็จะคอยกีดขวางไม่ให้แกน (rods) ดังกล่าวสามารถผ่านไปได้ ดังรูปที่ 4 ในแบบที่ถูไปมา ซึ่งอันนี้ก็จะอธิบายเพิ่มเติมโดยผู้อ่านควรดูรูปที่ 4 และ 5 ประกอบไปด้วย

โมเลกุล่าร์คอมพิวเตอร์แบบที่ทำงานด้วยกลไกที่เป็นความคิดของเดร็กซเลอร์ (Drexler) นี้ได้ใช้วงจรลอจิกที่อาศัยการเคลื่อนไหวของแกน (rods) แทนอิเล็กทรอนิกส์ โดยที่บนแกนต่าง ๆ จะมีปุ่มหรือน้อบ (Knobs) ติดอยู่ โดยจะมีสองแบบด้วยกัน คือ เกตน้อบ (gate knobs) กับโพรบน้อบ (probe knobs) เช่นที่แสดงในรูปที่ 4 และได้มีการออกแบบไม่ให้น้อบต่าง ๆ ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน เมื่อมาพบกันในรูปของการแตะสัมผัสแกนต่าง ๆ (rods) จะตัดกันในลักษณะตั้งฉาก โดยที่เกตน้อบที่อยู่ตรงจุดที่ตัดกันจะปิดกั้นไม่ให้โพรบน้อบวิ่งผ่านไปได้ ดังจะเห็นจากในรูปที่ 5 (1) ว่าเกตน้อบบนแกน y จะปิดกั้นโพรบน้อบบนแกน z เพื่อป้องกันไม่ให้น้อบดังกล่าวถูกผลักมาทางซ้าย อันทำให้แกนที่เป็นเอาต์พุตสามารถเคลื่อนขึ้นไปข้างบนได้ ส่วนในรูปที่ 5 (2) นั้น แกน z สามารถที่จะเลื่อนมาทางซ้ายได้ ซึ่งในขณะเดียวกันก็จะปิดกั้นไม่ให้แกนเอาต์พุตเคลื่อนขึ้นข้างบน ส่วนการที่จะให้เกตดังในรูปที่ 4 และ 5 ทำงานนั้นก็จะต้องทำให้โพรบเกตต่าง ๆ เคลื่อนลงไปข้างล่างหรือไปทางขวา เสร็จแล้วก็ไปตั้งให้แกนอินพุต x และ y ให้อยู่ในตำแหน่ง on และ off ตามที่ต้องการ จนในที่สุดก็จะมีการผลักแกนต่าง ๆ ที่มีโพรบน้อบติดอยู่ให้เคลื่อนที่และถ้าไม่มีเกตน้อบขวางอยู่ แกนดังกล่าวก็จะผ่านไปได้ ตำแหน่งใหม่ของแกนต่าง ๆ (rods) อันเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวไปมานี้

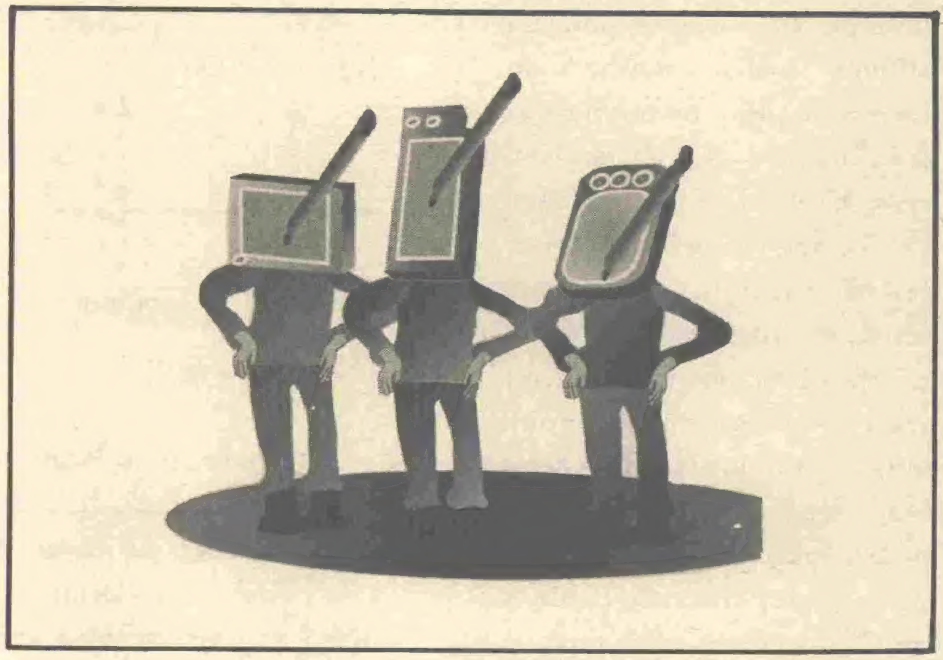


รูปที่ 5 (1) ภาพไดแกรมของก้าน (rod) ที่เป็นลอจิก NAND เกต คือตรงใดที่เกตน้อบ (gate knob) ที่อยู่บนแกน x หรือ y ที่ทำหน้าที่เป็นอินพุตไปขวางทางตรงจุดตัด (intersection) แกนที่เป็นเอาต์พุตก็จะเลื่อนไปมาได้ (2) ถ้า x และ y อยู่ในสภาพที่เป็น on ด้วยกันทั้งคู่ แกน z ก็จะเลื่อนไปมาได้และจะไปปิดทางเดินของแกนเอาต์พุต

จะมีผลกับแกนอันอื่น ๆ ในเกตอื่น ๆ ที่อยู่ในวงจร

ขนาดของ รอด ลอจิก นาโนคอมพิวเตอร์ (rod logic nanocomputer) ตามความคิดของเดร็กซเลอร์ จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนมิเตอร์ (nm) และจะทำงานได้เท่า ๆ กับไมโครโปรเซสเซอร์แบบง่าย ๆ อันหนึ่ง แม้ว่าคอมพิวเตอร์ตามแบบของเดร็กซเลอร์นี้อาจช้ากว่าแบบที่เป็น MED อยู่หลายเท่าก็ตาม แต่ก็ยังเร็วกว่าซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ เช่น Cray และแม้ว่าแกนต่าง ๆ (rods) จะเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า 10 เมตรต่อวินาที แต่ก็จะต้องเคลื่อนในระยะทางแค่เพียงไม่กี่นาโนมิเตอร์เท่านั้น อันทำให้มีความเร็วเกต (gate speeds) ที่ต่ำมาก ๆ คือ จะต่ำกว่าระดับนาโนวินาที (subnanosecond) คราวนี้ก็จะมาถึงเรื่องของเมมโมรีบ้างว่า เดร็กซเลอร์ได้มีความเห็นอย่างไรในเรื่องของการออกแบบหรือการสร้าง หน่วยความจำที่ทำงานเร็วมาก ๆ เช่น แรม (RAM) ซึ่งเดร็กซเลอร์ก็ได้แนะนำว่าน่าจะสร้างเมมโมรีเช่นนี้ในรูปของบล็อกของเมมโมรีเซลล์ทางกลที่มีแกน (rods) ที่เลื่อนไปมาได้ พร้อมด้วยแท็บ (tabs) ที่ไว้สำหรับเก็บข้อมูลด้วยการให้แกนบางอันยึดติดอยู่กับที่และให้แกนอื่น ๆ เคลื่อนไหวไปมาได้ แรมขนาด 64 เมกะไบต์ ในกรณีเช่นนี้จะมีขนาดเพียงด้านละ 70 นาโนมิเตอร์เท่านั้น ส่วนในกรณีของสตอเรจที่สำหรับเก็บข้อมูลมาก ๆ (mass storage) ก็อาจใช้โพลีเอ็ทธิลีน โมเลกุลที่มีความยาวมาก ๆ ในรูปของเทปให้ทำหน้าที่เก็บข้อมูลไว้ในปรมาณูของคาร์บอน โดยที่เทปแบบนี้จะมีความหนาแน่นกว่าแรมถึง 100 เท่า อุปกรณ์เก็บข้อมูลในรูปของเทปที่มีความหนาแน่นสูงเช่นที่มีความจุ 64 เมกะไบต์ ซึ่งจะมีทั้งตัวเทป, ม้วนเทป, ไดรฟ์และอุปกรณ์ไว้สำหรับอ่านและเขียน ก็จะมีเส้นผ่า-

ศูนย์กลางเพียง 10 นาโนมิเตอร์เท่านั้น ส่วนการแก้ปัญหาในเรื่องของการต้องสัมผัสกัน (contact problem) นั้น เดร็กซเลอร์ได้อาศัยวิธีที่จะไม่ให้มีอะไรมาสัมผัสติดกัน โดยการเปลี่ยนวิธีการเปลี่ยนมุมมองในเรื่องของอินเตอร์เฟสเสียใหม่ในแง่ที่ว่านาโนคอมพิวเตอร์ของเขาจะไม่ทำหน้าที่ในรูปของพีซีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งจะต้องมีการติดต่อด้วยคีย์บอร์ดกับสกรีน แต่เขาได้มีแผนที่จะให้นาโนคอมพิวเตอร์ของเขาทำหน้าที่เป็นเอเย่นต์อันชาญฉลาดที่สามารถเข้าไปอยู่ในเซลล์ของร่างกายของมนุษย์ เพื่อคอยให้คำแนะนำที่เกี่ยวกับการซ่อมแซมสิ่งสึกหรอหรือจัดการกับโรคภัยไข้เจ็บ หรือมีส่วนช่วยในการประกอบอุปกรณ์ชิ้นส่วนในระดับโมเลกุล เพื่อให้สามารถสร้างนาโนคอมพิวเตอร์ให้มากยิ่งขึ้นไปอีกในรูปของการแตกหน่อขยายพันธุ์



สร้างนาโนคอมพิวเตอร์

สิ่งที่ค่อนข้างจะแน่ในเรื่องของการสร้างนาโนคอมพิวเตอร์ก็จะเป็นว่างานส่วนใหญ่ในด้านนี้ในปัจจุบันจะเป็นหน้าที่ของนักเคมีเกือบทั้งหมด อันเนื่องจากว่าอาชีพของนักเคมีบางกลุ่มได้เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเลกุล ในระดับนาโนมิเตอร์มาเป็นเวลาหลายทศวรรษอยู่แล้ว จึงน่าจะมีประสบการณ์ทางนี้มากกว่านักวิทยาศาสตร์หรือวิศวกรสาขาอื่น ๆ แนวโน้มของเรื่องนี้จึงเป็นว่าวิชาเคมีกับวิศวกรรมพันธุกรรมจะเป็นช่องทางสำคัญในการสร้างนาโนคอมพิวเตอร์ ส่วนในแง่ของการปฏิบัตินั้นก็อาจสร้างโมเลกุล่าร์เกต (molecular gates) โดยอาศัยการเล่นแร่แปรธาตุในหลอดทดลองในรูปของปฏิกิริยาทางเคมี หรืออาจเป็นการสร้างโมเลกุลขึ้นมาทีละโมเลกุลจนกลายเป็นฟิล์มบาง ๆ อันเนื่องจากเทคนิคในด้านวิศวกรรมพันธุกรรมได้ทำให้มนุษย์สามารถสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนมาก ๆ ได้ โดยใช้แค่เพียงเสี้ยวของเวลาที่เคยใช้อยู่ ซึ่งสำหรับในปัจจุบันก็ได้มีการใช้วิธีการนี้ในการสร้าง MED แบบง่าย ๆ เช่น NAND เกต จนถึงขั้นที่ว่าวิศวกรพันธุกรรมสามารถที่จะสร้างโปรตีนชนิดพิเศษขึ้นมาเพื่อให้ทำหน้าที่ผูกมัดเชื่อมโยงโมเลกุลต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โปรตีนที่ได้ฉายาว่าเป็นนักออกแบบ ("designer" proteins) นี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับสร้าง MED ในวันพรุ่งนี้ โดยจะทำหน้าที่ในด้านการอ่านอินสตรัคชันต่าง ๆ รวมทั้งการประกอบชิ้นส่วนให้เข้าที่ อันเป็นการทำหน้าที่ที่จะเหมือน ๆ กับไรโบโซม (ribosomes) ในเซลล์ที่จะอ่านเจเนติก-โคด (genetic code) แล้วทำการประกอบโปรตีนต่าง ๆ ด้วยลำพังตนเอง วงจรในระดับโมเลกุลในโลกของวิศวกรรมพันธุกรรมและวิชาเคมีจึงสามารถประกอบตัวของมันเองขึ้นมาได้ โดยอาศัยสารละลายในหลอดทดลองเป็นแหล่งเพาะเชื้อ วิธีการเท่าที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ลงทุนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่น แต่ที่สำคัญที่สุดเห็นจะเป็นว่า การใช้วิธีการจากวิศวกรรมพันธุกรรมน่าจะเป็นวิธีที่ไว้ใจได้มากที่สุดในแง่ของการมีกลไกบางอย่างที่จะมาเลือกว่าโมเลกุลตัวไหนควรจะเข้ามายึดเกาะกับตัวไหน อันจะทำให้สามารถประกอบสิ่งที่ต้องการขึ้นมาได้สำเร็จ จึงเป็นที่เชื่อของนักวิจัยส่วนใหญ่ว่า การผลิตวงจรในระดับโมเลกุล ในทางอุตสาหกรรมแบบเต็มพิกัดอัตรา คงจะต้องอาศัยระบบทางชีววิทยาเช่นที่พูดมานี้อย่างหลีกไม่พ้น

นอกจากนี้ก็ยังมีอีกหนทางหนึ่งที่จะสร้างนาโนคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยวิธีที่เรียกว่า the Scanning Tunneling Electron Microscope (STEM) ซึ่งก่อนที่จะพูดอะไรต่อไป ก็จะขออธิบายความหมายของคำว่า tunneling เสียก่อนว่าจะหมายถึงกระบวนการที่เป็น

กึ่งควอนตัมกึ่งกล (quantum mechanical process) ที่แสดงภาวะความเป็นคลื่นของอนุภาคชนิดต่าง ๆ เช่นถ้าเมื่อนำคำนี้ไปเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนเมื่อใดก็จะหมายถึง ความสามารถของอิเล็กตรอนที่จะทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ โดยที่วิชาฟิสิกส์แบบเก่า (classical physics) ไม่ได้ยอมรับว่ามีปรากฏการณ์เช่นนี้อยู่ เว้นแต่จะมองในทัศนะของกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ที่ใช้ของหลักในด้าน tunneling ก็คือ การประดิษฐ์ ทันเนิล ไดโอด (tunnel diode) ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1957 อันเป็นการก้าวจากสิ่งที่เคยเป็นแค่เพียงทฤษฎีในด้าน tunneling ไปสู่ความเป็นจริงในเรื่องของอุปกรณ์ที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ คราวนี้ก็จะขอกลับเข้าสู่เรื่องของนาโนคอมพิวเตอร์ในแง่ของการใช้อุปกรณ์ เช่น STEM เพื่อเข้าไปบริหารจัดการกับความเล็กในระดับโมเลกุลหรือปรมาณูได้ตามที่ต้องการ คือในการใช้งานก็จะเป็นว่าอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า STEM นี้จะใช้หลักของอิเล็กตรอน ทันเนิลลิง (electron tunneling) ในการก่อให้เกิดเงาภาพหรืออิมเมจของแต่ละปรมาณู เพื่อให้สามารถเห็นความเป็นไปต่าง ๆ ในระดับความเล็กที่เรียกว่า ปรมาณูได้ก่อนที่จะลงมือเล่นแร่แปรธาตุ โดยอาจอาศัยวิธีการ เช่น การปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในเข็มที่เล็กมาก ๆ ที่อยู่เหนือผิวของสิ่งที่ต้องการจะทำอะไรสักอย่าง โดยให้อยู่ในระยะห่างราว 2-3 นาโนมิเตอร์ เพื่อจะได้สามารถหยิบจับโมเลกุลและปรมาณูจากที่หนึ่งไปวางไว้อีกที่หนึ่ง หรือทำให้อนุภาคดังกล่าวแตกออกเป็นเสี่ยง ๆ โดยอาศัยกระแสไฟในระดับต่าง ๆ กัน แม้ว่าเทคนิคเช่นนี้ยังคงเป็นของยากในปัจจุบัน (เช่น ยังมีปัญหาในเรื่องของการควบคุม) แต่ก็คงจะคลี่คลายไปในทางที่ดีขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งเมื่อถึงเวลานั้นมนุษย์ก็จะสามารถหยิบจับโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ทำโน่นทำนี่เช่นจับมาวางเรียงกันจนกลายเป็นวงจรขนาดเล็กมาก ๆ หรือเป็นสายไฟ ตลอดจนเป็นก้าน (rods) หรือจะให้เป็นฟันเฟือง (gears) ทางอุตสาหกรรมก็ได้อย่างสะดวก เพราะการรุดหน้าของเทคนิคเช่น กรณีของ STEM อนึ่ง STEM เทคโนโลยีนี้จะมีที่ใช้ที่กว้างไกลในแง่อื่น ๆ ในอาณาจักรของคอมพิวเตอร์ เช่นการผลิตระบบดาต้าสตอเรจที่ไว้สำหรับเก็บข้อมูลคราวละมาก ๆ ซึ่งเมื่อมองเข้าไปให้ลึกถึงระดับปรมาณูก็จะเห็นว่า บิตต่าง ๆ (bits) นั้นสามารถที่จะแทนด้วยกลุ่มของปรมาณูบนพื้นผิวของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นที่เก็บข้อมูล ซึ่งถ้าแต่ละบิตสำหรับในกรณีเช่นนี้จะแทนด้วยปรมาณูเป็นจำนวน 10 ตัวที่เรียงกันเป็นแถว ก็จะได้ว่าเนื้อที่เพียงแค่หนึ่งตารางเซนติเมตรก็จะสามารถเก็บข้อมูลได้ 100×10^{12} ไบต์ ซึ่งหมายถึงว่า ด้วยเนื้อที่ที่มีขนาดความกว้างยาวเพียง 20 ตารางเซนติเมตรก็จะมากพอที่จะใช้เก็บหนังสือทุกเล่มในโลกได้

สรุป

การที่จะสร้างโมเลกุล่าร์คอมพิวเตอร์ได้สำเร็จ ก็จะต้องสามารถนำโมเลกุล่าร์เกตตลอดจนสวิตช์ต่าง ๆ ให้รวมกันเป็นวงจรอันซับซ้อนให้ได้ในขั้นแรก ซึ่งสำหรับเมื่อราวสองปีที่แล้ว (1989) ก็ยังไม่ไปถึงขั้นนั้น คือยังอยู่ในขั้นของการสร้างและทดลองในส่วนของโมเลกุล่าร์เกตอยู่ รวมทั้งคอมพิวเตอร์ตามแนวความคิดของอีริค เดรกซเลอร์ ที่ยังคงเป็นความฝันเสียเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ในอีกราว 10-15 ปีข้างหน้า ความหวังที่จะเห็นโมเลกุล่าร์คอมพิวเตอร์ปรากฏขึ้นในห้องทดลองก็น่าจะมีความจริงอย่างมากหากการค้นคว้าที่เป็น basic research ที่ทำอยู่ในขณะนี้สามารถรุดหน้าไปได้เรื่อย ๆ และเมื่อถึงเวลานั้นคอมพิวเตอร์ก็จะเล็กลงไปอีกหลายเท่าตัวและเร็วขึ้นอีกมาก ๆ จนเป็นไปได้ว่า ถ้าจะมองพีซีไอบีเอ็มให้หดเล็กลงเท่าโมเลกุล ก็จะมีพีซีเช่นนี้นับเป็นพันพันล้านตัวในหนึ่งช้อนชา ที่น่าสนใจก็ถือว่าในโลกของโมเลกุล่าร์ คอมพิวติง เทคโนโลยี นั้นจะก่อให้เกิดความคล่องตัวและประโยชน์ใช้สอยในหลาย ๆ ด้านอย่างไม่เคยมีมาก่อน อันเนื่องจากได้เกิดมีสิ่งที่มีขนาดเล็กในระดับโมเลกุลที่มนุษย์จะสามารถสั่งให้ทำสิ่งที่ต้องการ รวมทั้งชอนไชเข้าไปในที่ต่าง ๆ นับตั้งแต่ในร่างกายคนจนถึงในดงแดนอันแสนเร้นลับ